

梁鹏飞, 辛惠娟, 李宗省, 等. 基于Budyko假设的党河径流变化归因[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 210–219.

## 基于Budyko假设的党河径流变化归因

梁鹏飞<sup>1</sup>, 辛惠娟<sup>1</sup>, 李宗省<sup>1,2</sup>, 南富森<sup>3</sup>, 唐彪<sup>1</sup>, 张文豹<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 高寒山区同位素生态水文与国家公园观测站/甘肃省祁连山生态环境研究中心/内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 流域水资源变化特征及其归因识别一直是水文研究的重要科学问题。本文以党河流域为研究区, 采用线性倾向估计等方法分析了流域气象、下垫面和水文要素变化特征, 基于Budyko水热耦合平衡方程量化了气候变化和人类活动对径流变化的贡献。结果表明: (1) 流域内气温呈升高趋势, 降水呈增加趋势, 气候向暖湿化方向发展; (2) 林地、草地、耕地、水域和建设用面积增加, 未利用地面积缩减; 冰川退缩速率为 $3.86 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ; 多年平均最大冻结深度平均递减速率为 $1.14 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ; (3) 党河径流年际递增速率为 $0.21 \text{ 亿 m}^3/10\text{a}$ , 年内分配为“双峰型”, 降水和气温对径流年内变化贡献分别为57.2%和42.8%, 气候变化和人类活动对径流变化贡献分别为59.46%和40.54%。

**关键词:** 党河; 气候变化; 径流; 归因分析; Budyko假设

**文章编号:** 1000-694X(2023)03-210-10

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00127

**中图分类号:** TV121

**文献标志码:** A

### 0 引言

在气候变化和人类活动的综合影响下, 全球水循环发生了显著变化<sup>[1-2]</sup>。径流是水文循环中极其重要的环节, 是地球陆地表面水体大量存在的具体载体, 河川径流作为重要的地表水资源, 直接影响着区域经济的可持续发展<sup>[3-4]</sup>。特别是1990年以来, 气候加速变暖, 冰川加速退缩, 冻土加速退化, 消融期逐渐延长, 水体多相态加速转换, 在此背景下, 区域的水文过程和生态环境效应将会逐渐突出, 使得支撑生态文明建设的水资源安全和保障面临着巨大的挑战<sup>[5-7]</sup>。特别是在干旱与半干旱地区, 水资源供给与需求的矛盾越来越明显。合理科学地评价气候变化和人类活动对流域水文过程的影响对区域水资源的科学管理和合理利用意义重大。

国内外学者和研究人员已对河西内陆河径流

变化特征及驱动机制做了大量研究, 但对党河流域研究较少, 而影响因素对径流变化的定量研究几乎空白, 少数研究只是做了定性描述<sup>[8-10]</sup>。已有研究表明, 党河流域气候有向“暖湿化”方向转化趋势, 高海拔山区升温幅度大于全球平均水平<sup>[11]</sup>; 受气温升高影响, 流域内冰川持续退缩<sup>[12-13]</sup>; 在多因素耦合影响下, 流域土地利用类型时空和景观格局动态也发生了显著变化<sup>[14]</sup>。赵玮等<sup>[15]</sup>利用同位素示踪技术研究了党河流域地下水地球化学特征及补给来源; 程玉菲等<sup>[16]</sup>分析了党河灌区地下水时空变化特征, 提出了地下水资源开采优化方案; 董艳辉等<sup>[17]</sup>通过构建水文循环概念模型, 分析河西地区的地下水流动模式, 指出地形对地下水流动具有主控作用; 王生霞等<sup>[18]</sup>分析了河西内陆河径流量和绿洲面积的响应关系, 指出绿洲面积随着出山径流变化呈现出阶段性特征; 丁宏伟等<sup>[19]</sup>基于昌马堡站水文资料, 分析了疏勒河出山径流年际、周期和丰平枯变

收稿日期: 2022-08-10; 改回日期: 2022-09-30

资助项目: 国家自然科学基金区域发展联合基金重点项目(U22A20592); 国家重点研发计划项目专题(2020YFA0607702); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目专题(2019QZKK0405); 兰州交通大学青年基金项目(2018005); 甘肃省黄河水环境重点实验室开放基金项目(21YRWEG005)

作者简介: 梁鹏飞(1998—), 男, 甘肃会宁人, 硕士研究生, 主要从事寒旱区水文与水资源等方面的研究。E-mail: liangpf0113@163.com

通信作者: 辛惠娟(E-mail: xinhj642@163.com); 李宗省(E-mail: lizxhhs@163.com)

化特征。而径流变化是气候变化和人类活动共同作用的结果,量化气候变化和人类活动对径流变化的贡献,可以揭示影响水文过程的主导因素,对水资源管理者和决策者具有重要的参考价值。目前国内外量化气候变化和人类活动对径流变化贡献的方法主要有水文模型法、双累积曲线法和Budyko假设等方法<sup>[20-25]</sup>。近年来,基于Budyko假设定量识别影响因素对径流变化的贡献已经很成熟,被广泛应用于各大流域的研究<sup>[26-28]</sup>。综上所述,气候变化和人类活动导致的地表条件变化已成为径流变化的最重要影响因素,有必要开展其对党河径流变化的影响机制研究。

由于党河流域恶劣的自然环境和复杂的地形条件,准确评估径流变化的影响机制一直是一个难题,对径流变化影响因素的定量研究还远远不够。本文基于水文气象等资料,运用重心模型、集中度等分析方法,全面深入地探讨了党河流域气候、径流和土地利用变化特征及径流对气候变化和下垫面变化的响应,采用Budyko假设量化了气候变化和下垫面变化对径流变化的贡献率,研究结果可为党河流域后续生态工程的实施、水资源的合理配置和科学管理提供有价值的指导。

## 1 研究方法

### 1.1 统计分析方法

本文采用线性拟合和5 a滑动平均分析径流年际变化特征;采用M-K突变分析法<sup>[29]</sup>研究径流序列年际变化突变点;采用线性倾向估计,通过计算Slope值<sup>[30]</sup>分析气温、降水、最大冻结深度等要素的变化趋势。

### 1.2 重心迁移模型

采用重心模型<sup>[31]</sup>分析不同土地利用类型的时空变化特征,重心坐标以经纬度表示,则第 $t$ 年的某种土地利用类型的重心经纬度可以表示为:

$$Y_t = \sum_{i=1}^n (C_{it} \times Y_i) / \sum_{i=1}^n C_{it} \quad (1)$$

$$X_t = \sum_{i=1}^n (C_{it} \times X_i) / \sum_{i=1}^n C_{it} \quad (2)$$

式中: $X_t$ 和 $Y_t$ 分别表示第 $t$ 年某土地利用类型重心的经纬度坐标; $X_i$ 和 $Y_i$ 分别表示某土地利用类型第 $i$ 个斑块重心的经纬度坐标; $C_{it}$ 表示第 $t$ 年某土地利用

类型第 $i$ 个斑块的面积。

### 1.3 集中度和集中期计算

径流集中度反映了径流量在年内分配的集中程度,指各月径流量按月以向量方式累加,其各分量之和的合成量占年径流量的百分数。径流集中期反映了全年径流量集中的重心所出现的月份,指径流向量合成后的方位,以12个月分量和的比值正切角表示,具体计算过程见参考文献[32]。

### 1.4 径流年内变化归因分析方法

Lu等<sup>[33]</sup>把月径流变化与降水、气温等联系起来,研究了它们对径流变化的贡献。党河流域月径流( $R$ )主要受降水( $P$ )和气温( $T$ )的影响,它们之间的关系可以用下式表示:

$$R = R(P, T) \quad (3)$$

径流与降水、温度关系能够用多元回归确定。径流的变化能够通过降水和温度的变化来解释。具体可表示为:

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial R}{\partial T} \Delta T \quad (4)$$

式中: $\frac{\partial R}{\partial P}$ 、 $\frac{\partial R}{\partial T}$ 近似取对应因子的多元回归系数,表示降水和温度对径流的贡献率,各因子对径流年内变化的贡献可以近似地用因子贡献率乘以各因子的标准差来表示。“正贡献”指气候因子的变化引起径流增加,“负贡献”指气候因子的变化引起径流减少<sup>[34]</sup>。

### 1.5 径流年际变化归因分析方法

#### 1.5.1 水量平衡方程

流域的水量平衡方程为:

$$R = P - ET - \Delta S \quad (5)$$

式中: $R$ 为径流深(mm); $P$ 为降水量(mm); $ET$ 为实际蒸散量(mm); $\Delta S$ 为流域储水变化量(mm)。

根据Budyko假设<sup>[35]</sup>,流域水热耦合平衡方程可以表达为:

$$ET = \frac{P \times ET_0}{(P^\omega + ET_0^\omega)^{\frac{1}{\omega}}} \quad (6)$$

式中: $ET_0$ 为流域多年平均潜在蒸散量(mm); $\omega$ 为流域下垫面参数。

在分析长时间水文序列时,一般假定 $\Delta S$ 为0,则结合(3)、(4)式,流域水量平衡方程可以表示为:

$$R = P - \frac{P \times ET_0}{(P^\omega + ET_0^\omega)^{\frac{1}{\omega}}} \quad (7)$$

$R$ 、 $P$  和  $ET_0$  都已知, 则可计算得出流域下垫面参数  $\omega$ 。

### 1.5.2 敏感性分析

为了定量分析径流变化与影响因素之间的联系, 采用 Schaake<sup>[36]</sup> 的方法, 研究径流对气候要素的敏感性。定义弹性系数为:

$$\varepsilon_{y_i} = \frac{\partial R_i}{\partial y_i} \times \frac{y_i}{R_i} \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon_{y_i}$  是弹性系数;  $y_i$  为年降水量 ( $P$ )。根据年平均潜在蒸散发 ( $ET_0$ ) 和下垫面参数 ( $\omega$ ), 假设:

$$\Phi = \frac{ET_0}{P} \quad (9)$$

则各影响因素的弹性系数计算公式如下:

$$\varepsilon_P = \frac{(1 + \Phi^\omega)^{\frac{1}{\omega} + 1} - \Phi^{\omega + 1}}{(1 + \Phi^\omega) \left[ (1 + \Phi^\omega)^{\frac{1}{\omega}} - \Phi \right]} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{ET_0} = \frac{1}{(1 + \Phi^\omega) \left[ 1 - (1 + \Phi^{-\omega})^{\frac{1}{\omega}} \right]} \quad (11)$$

$$\varepsilon_\omega = \frac{\ln(1 + \Phi^\omega) + \Phi^\omega \ln(1 + \Phi^{-\omega})}{\omega(1 + \Phi^\omega) \left[ 1 - (1 + \Phi^{-\omega})^{\frac{1}{\omega}} \right]} \quad (12)$$

### 1.5.3 影响因素对径流变化的贡献

根据  $M-K$  突变分析法确定的径流年际变化突变点将研究时期分为基准期和人类活动期 (可以是多个时段), 假设基准期的流域多年平均径流深为  $R_1$ , 人类活动期的流域多年平均径流深为  $R_2$ , 则从基准期到人类活动期径流深变化之差 ( $dR$ ) 可以表示为:

$$dR = R_2 - R_1 \quad (13)$$

同理, 从基准期到人类活动期降水量之差 ( $dP$ )、潜在蒸散发量之差 ( $dET_0$ ) 和下垫面参数之差 ( $d\omega$ ) 可以分别表示为:

$$dP = P_2 - P_1 \quad (14)$$

$$dET_0 = ET_{02} - ET_{01} \quad (15)$$

$$d\omega = \omega_2 - \omega_1 \quad (16)$$

径流变化可以用各因子变化与其偏导数的乘积和来表示, 则径流变化可以用下面微积分方程计算:

$$dR' = \frac{\partial R}{\partial P} dP + \frac{\partial R}{\partial ET_0} dET_0 + \frac{\partial R}{\partial \omega} d\omega \quad (17)$$

式中:  $dR'$  是计算所得到的径流深变化量。式 (17) 可以简化表达为:

$$dR' = dR_P + dR_{ET_0} + dR_\omega \quad (18)$$

$dR_P$ 、 $dR_{ET_0}$  和  $dR_\omega$  分别表示降水变化、潜在蒸散量和下垫面变化导致的径流变化量。

$$dR_{x_i} = \varepsilon_{x_i} \frac{R}{x_i} dx_i \quad (19)$$

每个变量对径流变化的相对贡献可以表示为:

$$C_{x_i} = \frac{dR_{x_i}}{dR'} \times 100\% \quad (20)$$

式中:  $C_{x_i}$  为变量  $x_i$  的相对贡献<sup>[37]</sup>。

## 2 研究区和数据

### 2.1 研究区概况

党河流域 (37.91°—40.45°N, 94.27°—98.13°E) 发源于祁连山区, 行政区划包括敦煌市及肃北蒙古族自治县的一部分, 是河西三大内陆河之一疏勒河的一级支流 (图 1)。党城湾水文站控制的集水面积约为 1.4 万 km<sup>2</sup>, 流域海拔 1 000~5 800 m。河流主要靠大气降水、地下水和冰川融水补给, 汛期集中在 6—9 月, 其中每年 3 月中旬河流开始解冻, 4 月形成的“春汛”流量也相对较大。流域深居内陆, 昼夜温差大, 属于典型的大陆性干旱气候类型, 年平均气温 3.9~9.3 °C, 多年平均降水量为 158 mm。流域内主要的地貌类型为高寒草原和荒漠草原, 有汉、回、藏、蒙古等多民族聚居区, 旅游资源和矿产资源丰富, 以畜牧业、旅游业和种植业为主。

### 2.2 数据来源

#### 2.2.1 气象数据

气象数据来自中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.gov.cn>), 本文选取了敦煌、酒泉等 8 个气象站点, 时间序列统一为 1966—2017 年, 该数据集时间分辨率为 1 d。另外本文还选取了盐池湾、党城湾和昌马堡等 13 个雨量站点的实测降水月值数据, 时间序列为各雨量站自建站到 2020 年。

#### 2.2.2 径流数据

径流数据采用党城湾水文站 1966—2020 年实测月径流数据, 其中 1980 年 4 月缺测, 通过前后 10 年同期数据的平均值代替处理。

#### 2.2.3 下垫面数据

本文使用的下垫面数据均来自于国家青藏高原



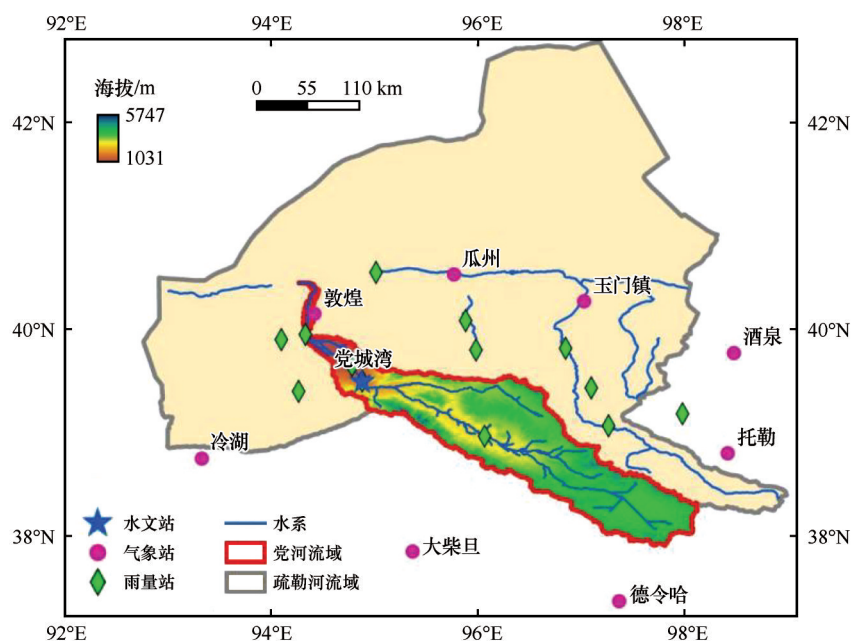


图1 研究区位置及水文气象站点分布

Fig.1 Location of the study area and distribution of hydrological and meteorological stations

原科学数据中心网站 (<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)。本文采用1980年和2020年两期的土地利用数据分析党河流域土地利用格局空间变化,数据空间分辨率为1 km;采用1980—2015年冰川边界数据分析党河流域冰川面积变化特征,数据时间分辨率为5 a,空间分辨率为30 m;采用1960s—2010s最大冻结深度数据集分析党河流域冻土变化特征,数据时间分辨率为10 a,空间分辨率1 km。

### 3 结果与分析

#### 3.1 气候因素变化

##### 3.1.1 气温变化特征

利用 ArcGIS 软件对 1966—2017 年年平均气温、最高气温、最低气温进行反距离权重法插值,得到气温变化空间分布特征(图2)。春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12月至次年2月)按照传统方法进行分类。结果表明,在过去几十年里,党河流域表现出明显的升温趋势。党河流域年平均气温、最高气温、最低气温和四季气温的线性趋势空间分布上都表现出升高趋势,升温率为0.17~0.74 °C/10a。其中冬季气温的升高幅度最大,升温率为0.49 °C/10a,夏季气温升高幅度最小,升温率为0.22 °C/10a。流域源区、上游和中游升温幅度较大,而春季气温升高区域主要发生在流域

下游。

##### 3.1.2 降水变化特征

利用 ArcGIS 软件对 1966—2017 年降水数据进行反距离权重法插值,得到降水变化空间分布特征(图3)。党河流域降水在年尺度和季节尺度上的线性趋势空间分布上整体表现出增多趋势,增加幅度为-0.12~17.78 mm/10a。其中年降水增加幅度为7.41 mm/10a,季节尺度上,夏季降水增加幅度最大,变化率为5.37 mm/10a,冬季降水增加幅度最小,变化率为0.13 mm/10a。空间分布上,流域下游降水在冬季表现出减少趋势。

#### 3.2 下垫面变化

##### 3.2.1 土地利用变化特征

采用1980年和2020年两期的土地利用数据,通过 ArcGIS 软件重投影和裁剪得到党河流域土地利用空间分布格局(图4)。党河流域主要的土地利用类型为草地和未利用地,分别约占总面积的34.9%和59.4%。2020年相较于1980年,林地、草地、耕地、水域和建设用地分别增加了9.8、306.6、0.5、253.1、6.7 km<sup>2</sup>,未利用地减少了576.8 km<sup>2</sup>。选取1980年和2020年两期的土地利用类型数据,利用重心迁移模型,对党河流域不同土地利用类型的重心迁移方向做了动态分析。草地重心向西南方向偏移,迁移距离小;林地重心向西南方向偏移,迁

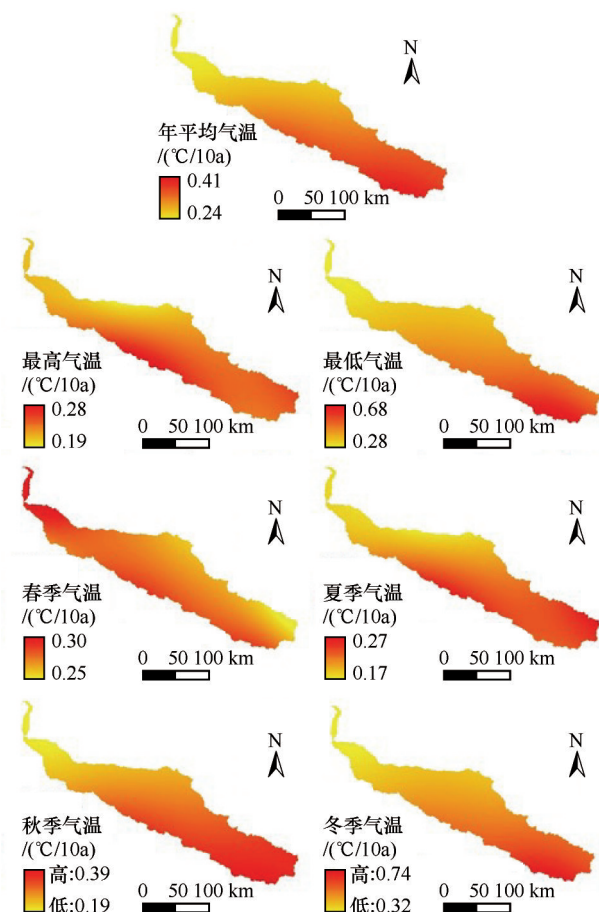


图2 1966—2017年平均气温、最高气温、最低气温和季节变化趋势空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual and seasonal trends of mean / maximum / minimum temperature during 1966–2017

移距离较大;耕地重心基本保持不变;水域重心向东南方向偏移,迁移距离大;建设用地重心向东偏

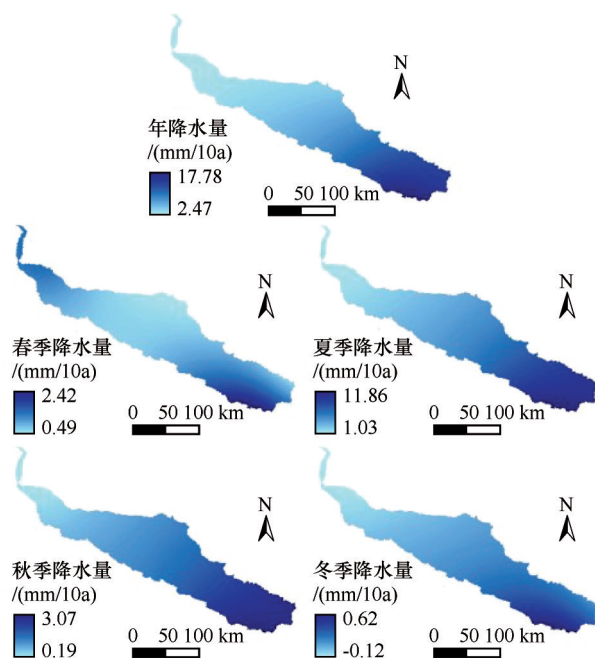


图3 1966—2017年降水量和季节变化趋势空间分布

Fig.3 Spatial distribution of annual and seasonal trends of precipitation during 1966–2017

移,迁移距离较小;未利用地重心向东南偏移,迁移距离小。

### 3.2.2 冰川、冻土变化特征

通过ArcGIS软件重投影、裁剪和统计最后得到党河流域1980—2015年冰川面积数据(图5)。冰川主要分布在党河流域中上游的高海拔山区。过去几十年里,冰川面积整体呈现出减少变化趋势,从1980年的559.41  $\text{km}^2$ 退缩到2015年的433.35  $\text{km}^2$ ,共退缩了126.06  $\text{km}^2$ ,退缩率为22.53%,多年平均退

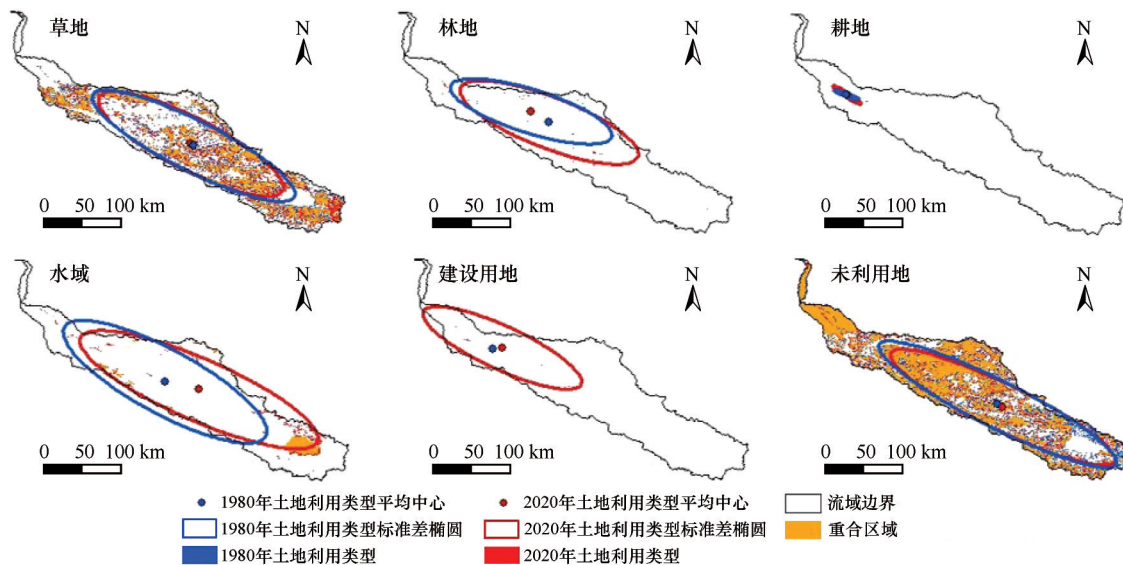


图4 1980年和2020年不同土地利用类型重心迁移空间分布

Fig.4 Spatial distribution of center of gravity migration of different land use types in 1980 and 2020

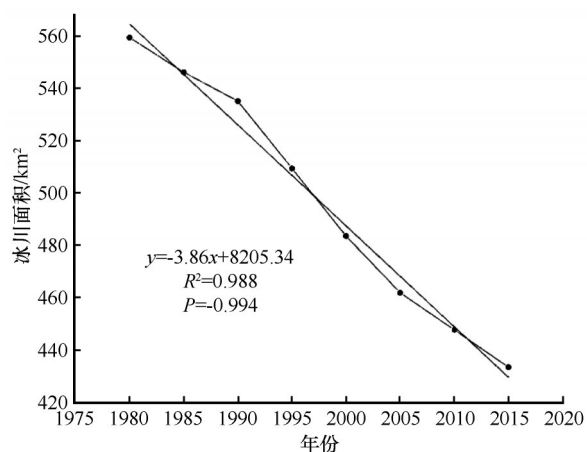


图5 1980—2015年冰川面积年际变化

Fig.5 Interannual variation of glacier area during 1980–2015

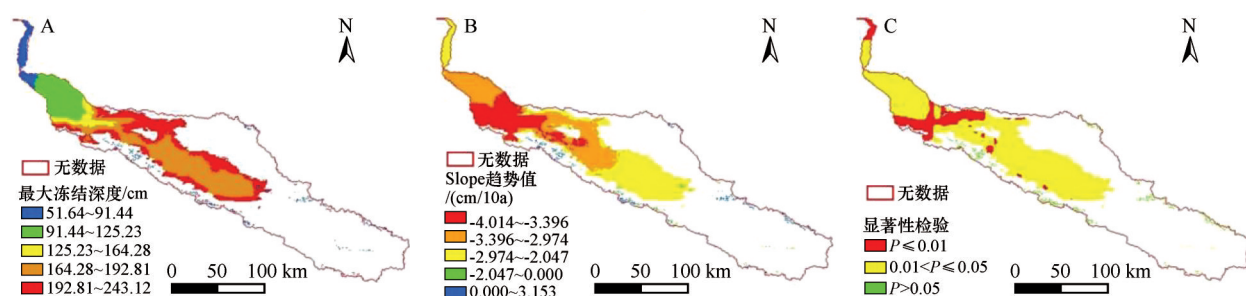


图6 1960s—2010s 多年平均最大冻结深度(A)、最大冻结深度变化率(B)、最大冻结深度变化显著性检验(C)

Fig.6 Annual average maximum freezing depth (A), rate of change of maximum freezing depth (B), test significance of changes in maximum freezing depth (C) during 1960s–2010s

### 3.3 径流变化及归因分析

#### 3.3.1 径流变化特征

通过M-K突变检验分析,在1966—2020年,党城湾站径流序列统计量UF和UB相交于1981年,且落在0.05显著性水平阈值内,即认为党城湾站径流在1981年可能发生突变,且突变分析通过了显著性检验,突变趋势明显(图7)。根据突变分析,将径流序列分为基准期(1966—1981年)和人类活动期(1982—2020年)。谢建丽等<sup>[39]</sup>通过M-K突变检验分析得到党城湾站1982年后年平均流增幅变大,这与本文研究所得到的突变点有些偏差,其原因可能主要是径流资料序列长度不同所导致的。

党城湾站多年平均径流量为3.66亿 $\text{m}^3$ ,1966—2020年党城湾径流年际变化整体呈现出增加趋势,递增速率为0.21亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ 。基准期径流递增速率为0.20亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ ,人类活动期径流递增速率为0.11亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ 。基准期多年径流量均值为3.13亿 $\text{m}^3$ ,人类

活动期多年径流量均值为3.87亿 $\text{m}^3$ ,共增加了0.74亿 $\text{m}^3$ ,增加率为23.6%(图8)。党河流域年内径流过程在每年的4月和7月会出现“双峰”效应,且与基准期相比,人类活动期呈现出明显的增加趋势,

党河流域季节性冻土主要分布在流域中下游,多年冻土主要分布在上游和源区的高海拔地区。图6为1960s—2010s党河流域多年平均最大冻结深度空间分布,均值为165.42 cm,变化范围为51.64~243.12 cm,沿流域水流方向最大冻结深度逐步变小。通过Slope趋势值法分析得到党河流域最大冻结深度变化率,整体呈现出减少变化趋势,平均变化幅度 $-1.14 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,其中人类活动区减小趋势最为明显,并且大多数区域通过了0.05显著性检验。

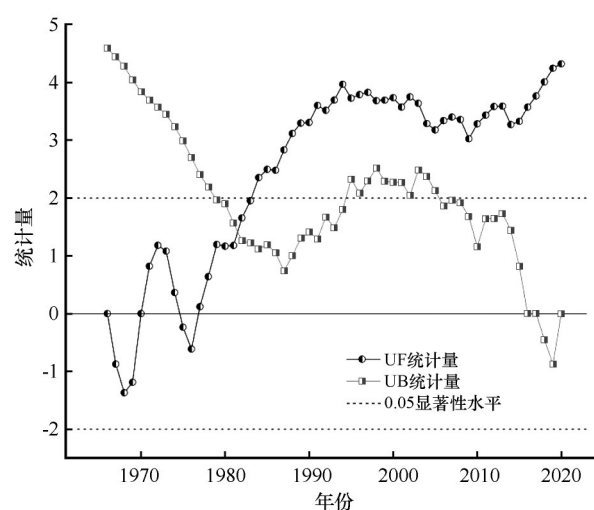


图7 1966—2020年径流M-K突变检验分析

Fig.7 Analysis of runoff M-K mutation test during 1966–2020

活动期多年径流量均值为3.87亿 $\text{m}^3$ ,共增加了0.74亿 $\text{m}^3$ ,增加率为23.6%(图8)。党河流域年内径流过程在每年的4月和7月会出现“双峰”效应,且与基准期相比,人类活动期呈现出明显的增加趋势,



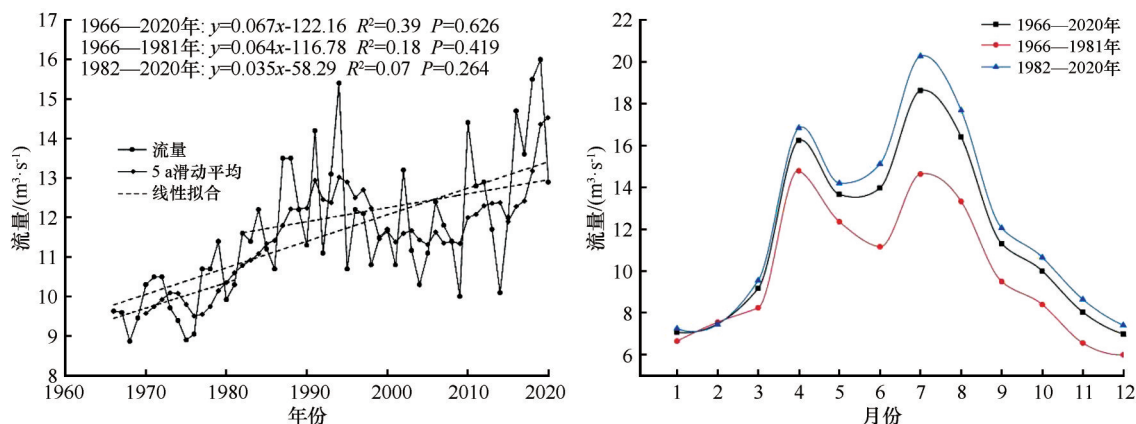


图8 1966—2020年径流年际变化、年内变化

Fig.8 Interannual variation and annual variation of runoff during 1966–2020

整体增加了23.5%，径流增加主要发生在7月和8月，分别增加了38.5%和32.6%。

党城湾站径流的集中度为0.14~0.34，集中度年代变化趋势为增大趋势，表明径流年内分配不均匀性增加，径流更加集中(图9)。基准期党城湾径流的集中度均值为0.20，人类活动期均值为0.23。

由于党河径流年内分配“双峰”效应的特殊性，径流年内集中期并未像其他流域与径流峰值出现时间相吻合，而是集中期处于4月“第一峰”和7月“第二峰”之间。党城湾站径流集中期年代变化整体呈现出延后趋势，其中1970s—1990s和2000s—2010s集中期延后，1990s—2000s集中期提前。

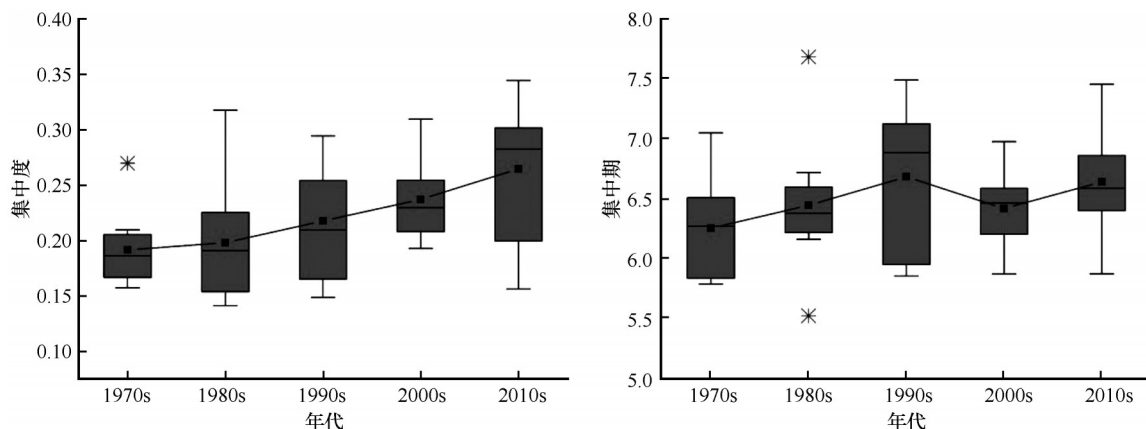


图9 径流集中度和集中期年代变化

Fig.9 Temporal variation of runoff concentration degree and concentration periods

### 3.3.2 径流年内变化量化归因分析

影响径流年内变化的主要气象因子是降水和气温，降水和气温对径流年内变化贡献率分别为57.2%和42.8%(图10)。降水对径流的贡献一直为“正贡献”，且每年的1—6月，贡献量处于上升趋势，到6月达到最大值，然后开始下降；气温对径流的贡献也一直是“正贡献”，这可以解释为气温升高导致冰川消融和积雪融化对径流的补给量大于气温升高导致径流蒸发的损失量，从而掩盖了在大多数流域气温对径流量的影响为“负贡献”这一现象。整体而言，每年的秋末和冬季，即每年的10月到次年

的3月，气温和降水共同影响径流，气温的贡献量较大；每年的3—10月，降水对径流的影响占绝对的主导地位。所以党河径流在4月形成的春汛“第一峰”，主要受降水和气温的共同影响，降水贡献较大，但气温的逐渐回升使冰川消融和积雪融化对径流的补给量不容忽视；径流在7月形成的“第二峰”则主要是受降水影响。

### 3.3.3 径流年际变化量化归因分析

表1列出了党河流域基准期和人类活动期各气象水文特征值和径流对降水、潜在蒸散发和下垫面参数的弹性系数。与基准期相比，人类活动期的径

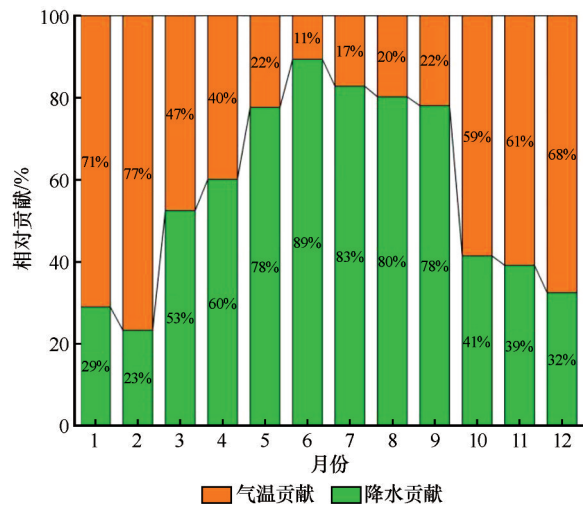


图 10 降水和气温对径流年内变化相对贡献  
Fig.10 Relative contribution of precipitation and temperature to annual runoff variation

流深( $R$ )、降水( $P$ )、径流系数( $R/P$ )增大,而潜在蒸散发( $ET_0$ )、下垫面参数( $\omega$ )、干旱指数( $ET_0/P$ )变小。

在基准期,径流对降水弹性系数为 1.55,即降水增加 1.00%,径流增加 1.55%;径流对潜在蒸散发弹性系数为-1.91,即潜在蒸散发增加 1.00%,径流减少 1.91%;径流对下垫面参数弹性系数为-7.87,即下垫面参数增加 1.00%,径流减少 7.87%。在人类变化期,径流对降水弹性系数、潜在蒸散发和下垫面参数弹性系数绝对值相比基准期都变小。

气候变化(降水和潜在蒸散发)和下垫面变化(下垫面参数)对党河径流变化的量化分析如表 2。气候变化对径流变化贡献占 59.46%,人类活动引起的下垫面变化对径流变化贡献占 40.54%,表明气候变化是党河径流增加的主要原因。其中下垫面变化是主要的影响因素,贡献占 40.54%,降水变化次之,贡献占 37.76%,潜在蒸散发变化影响最小,贡献仅占 21.70%。张晓晓等<sup>[8]</sup>采用双累积曲线法研究表明党河径流受气候变化影响较大,而受人类活动影响较小,这与本研究结果一致。

表 1 党河流域气象水文变量特征值									
Table 1 Characteristic values of meteorological and hydrological variables in Danghe River Basin									
时期	$ET_0/\text{mm}$	$R/\text{mm}$	$P/\text{mm}$	$\omega$	$R/P$	$ET_0/P$	弹性系数		
							$E_p$	$\varepsilon_{ET0}$	$\varepsilon_\omega$
基准期(1966—1981 年)	1 282.4	21.9	102.0	0.68	0.21	12.58	1.55	-1.91	-7.87
变化期(1982—2017 年)	1 233.2	26.6	111.1	0.67	0.24	11.10	1.53	-1.85	-7.49

表 2 党河径流变化的归因识别								
Table 2 Attribution and identification of runoff changes in Danghe River								
基准期	人类活动期	$dR_p$	$dR_{ET0}$	$dR_\omega$	$dR$	$C_p/\%$	$C_{ET0}/\%$	$C_\omega/\%$
1966—1981 年	1982—2020 年	3.26	1.87	3.50	8.63	37.76	21.70	40.54

4 结论

1966—2017 年,党河流域表现出温度升高趋势,升温率为 0.17~0.74 °C/10a,其中冬季气温的升高幅度最大,升温率为 0.49 °C/10a;流域降水量整体表现出增多趋势,增加幅度为-0.12~17.78 mm/10a,夏季降水增加幅度最大,变化率为 5.37 mm/10a,冬季降水增加幅度最小,变化率为 0.13 mm/10a。

流域内林地、草地、耕地、水域和建设用地面积增加,未利用地面积缩减;冰川面积从 1980 年的 559.41 km<sup>2</sup>退缩到 2015 年的 433.35 km<sup>2</sup>,共退缩了 126.06 km<sup>2</sup>,退缩率为 22.53%,多年平均退缩速率为 3.86 km<sup>2</sup>·a<sup>-1</sup>,退缩明显;流域多年平均最大冻结深度整体呈现出减少变化趋势,平均变化幅度-1.14

cm·a<sup>-1</sup>,其中人类活动区减小趋势最为明显。

径流年际变化整体呈现出增加趋势,递增速率为 0.21 亿 m<sup>3</sup>/10 a;径流在年内分配上表现出“双峰型”,并且年内分配不均匀性增加,更加集中;降水和气温对径流年内变化贡献分别为 57.2%和 42.8%,气候变化和人类活动对径流变化贡献分别为 59.46%和 40.54%,其中下垫面变化是径流变化主要的影响因素,降水变化影响次之,潜在蒸散发变化影响最小。

参考文献:

[1] 胡春宏,郑春苗,王光谦,等.“西南河流域区径流变化和适应性利用”重大研究计划进展综述[J].水科学进展,2022,33(3):337-359.



- [2] Yang L S, Feng Q, Yin Z L, et al. Regional hydrology heterogeneity and the response to climate and land surface changes in arid alpine basin, northwest China[J]. CATENA, 2019, 187(3): 104345.
- [3] 梁鹏飞, 李宗杰, 辛惠娟, 等. 黄河源区径流变化特征及影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(4): 64-71.
- [4] 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004(6): 535-543.
- [5] Li Z X, Yuan R F, Feng Qi, et al. Climate background, relative rate, and runoff effect of multiphase water transformation in Qilian Mountains, the third pole region[J]. Science of the Total Environment, 2019, 663: 315-328.
- [6] Li Z J, Li Z X, Feng Q, et al. Hydrological effects of multiphase water transformation in Three-River Headwaters Region, China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 601(3): 126662.
- [7] Li Z X, Li Z J, Feng Q, et al. Runoff dominated by supra-permafrost water in the source region of the Yangtze River using environmental isotopes[J]. Journal of Hydrology, 2019, 582(1): 124506.
- [8] 张晓晓, 张钰, 徐浩杰, 等. 河西走廊三大内陆河流域出山径流变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 66-72.
- [9] 邓振镛, 张强, 王润元, 等. 河西内陆河径流对气候变化的响应及其流域适应性水资源管理研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1267-1275.
- [10] 高黎明, 张耀南, 冯起. 河西内陆河地区径流模型概述[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 259-269.
- [11] 蓝永超, 沈永平, 高前兆, 等. 祁连山西段党河山区流域气候变化及其对出山径流的影响与预估[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1259-1267.
- [12] Tian H Z, Yang T B, Liu Q P. Climate change and glacier area shrinkage in the Qilian Mountains, China from 1956 to 2010[J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(66): 187-197.
- [13] 汪赢政, 李佳, 吴立新, 等. 1987-2018年祁连山冰川变化遥感监测及影响因子分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 344-356.
- [14] 赵方圆, 杨宇翔, 张华堂, 等. 土地利用及景观格局动态变化分析: 以甘肃省党河流域为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 235-241.
- [15] 赵玮, 马金珠, 何建华. 党河流域敦煌盆地地下水补给与演化研究[J]. 干旱区地理, 2015, 38(6): 1133-1141.
- [16] 程玉菲, 胡想全, 李元红, 等. 党河灌区地下水动态及开采优化分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(4): 140-144.
- [17] 董艳辉, 符韵梅, 王礼恒, 等. 甘肃北山-河西走廊-祁连山区域地下水循环模式[J]. 地质科技通报, 2022, 41(1): 79-89.
- [18] 王生霞, 王飞. 河西内陆河流域绿洲面积对地表径流的响应[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 231-241.
- [19] 丁宏伟, 魏余广, 李爱军, 等. 疏勒河出山径流量变化特征及趋势分析[J]. 干旱区研究, 2001(3): 48-53.
- [20] Abera W, Tamene L, Abegaz A, et al. Understanding climate and land surface changes impact on water resources using Budyko framework and remote sensing data in Ethiopia[J]. Journal of Arid Environments, 2019, 167(6): 56-64.
- [21] Farsi N, Mahjour N. Evaluating the contribution of the climate change and human activities to runoff change under uncertainty[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 872-891.
- [22] Onyutha C, Nyesigire R, Nakagiri A. Contributions of human activities and climatic variability to changes in River Rwizi Flows in Uganda, East Africa[J]. Hydrology, 2021, 8(4): 145.
- [23] 杜勇, 李建柱, 牛凯杰, 等. 1982-2015年永定河山区植被变化及对天然径流的影响[J]. 水利学报, 2021, 52(11): 1309-1323.
- [24] 张建云, 张成凤, 鲍振鑫, 等. 黄淮海流域植被覆盖变化对径流的影响[J]. 水科学进展, 2021, 32(6): 813-823.
- [25] 苏辉东, 贾仰文, 刘欢, 等. 基于WEP-L模型的寒区流域径流演变模拟及归因分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1523-1530.
- [26] 刘宇, 管子隆, 田济扬, 等. 近70 a 泾河流域径流变化及其驱动因素研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 17-26.
- [27] 杨林, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于Budyko假设的洮河与大夏河径流变化归因识别[J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8421-8429.
- [28] 杜嘉妮, 蔡宜晴, 王岗. 长江源区径流变化归因分析[J]. 水文, 2021, 41(6): 73-78.
- [29] 刘闻, 曹明明, 宋进喜, 等. 陕西年降水量变化特征及周期分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 865-874.
- [30] 刘浏, 牛乾坤, 衡静霞, 等. 雅鲁藏布江流域干湿转换特征及植被动态响应[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 175-184.
- [31] 魏静, 刘丽丽, 王红云, 等. 1990-2020年太行山区土地利用景观格局时空变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(7): 1123-1133.
- [32] 刘贤超, 李嘉竹, 宿庆, 等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. 地理科学, 2007(6): 791-795.
- [33] Lu E, Takle E S, Manoj J. The Relationships between climatic and hydrological changes in the Upper Mississippi River Basin: a SWAT and Multi-GCM study[J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(2): 437-451.
- [34] Wang H, Li D L, Jiang Y C. Characteristics and reasons of the runoff variation in source regions of the Yellow River during 1956-2012[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 403-412.
- [35] Budyko M I. Climate and Life[M]. Pittsburgh, USA: Academic Press, 1974.
- [36] Schaake J C. From climate to flow[M]//Waggoner P E. Climate Change and US Water Resources. New Jersey, USA: Wiley Series in Climate and the Biosphere (USA), 1990: 177-206.
- [37] 张丽梅, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于Budyko假设的渭河径流变化归因识别[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7607-7617.
- [38] 高鑫, 张世强, 叶柏生, 等. 河西内陆河流域冰川融水近期变化[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 344-350.
- [39] 谢建丽, 张德栋, 刘圆圆. 祁连山区主要河流径流演变及趋势预测分析[J]. 水文, 2011, 31(5): 88-91.

## Study on the attribution of runoff variation in the Danghe River based on the Budyko hypothesis

Liang Pengfei<sup>1</sup>, Xin Huijuan<sup>1</sup>, Li Zongxing<sup>1,2</sup>, Nan Fusen<sup>3</sup>, Tang Biao<sup>1</sup>, Zhang Wenbao<sup>1</sup>

(1.School of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2.Observation and Research Station of Eco-Hydrology and National Park by Stable Isotope Tracing in Alpine Region / Gansu Qilian Mountains Ecology Research Center / Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3.College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The characteristics of watershed water resources changes and their attribution identification have been important scientific problems in hydrological research. we analyzed the characteristics of meteorological, subsurface and hydrological elements changes using methods such as linear propensity estimation, and quantified the contributions of climate change and human activities to runoff changes based on based on Budyko hypothesis in Danghe River basin. The results show that the temperature and precipitation showed an increasing trend, and the climate developed toward the direction of warming and humidification. The area of forestland, grassland, arable land, water area and construction land increased while the area of unused land decreased; the glacier retreat rate was  $-3.86 \text{ km}^2 \cdot \text{yr}^{-1}$ ; the average decrease rate of the annual average maximum freezing depth was  $-1.14 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ . The interannual increasing rate of runoff was  $0.21 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{yr}$ , and the intra-annual distribution of runoff depicted a double-peak effect, the contributions of precipitation and temperature to the annual variation of runoff were 57.2% and 42.8%, respectively, and the contributions of climate change and human activities to the annual variation of runoff were 59.46% and 40.54%, respectively. The results of the study can provide a reference for the scientific management and optimal allocation of water resources in Danghe River basin.

**Key words:** Danghe River; climate change; runoff; attribution analysis; Budyko hypothesis